

# Анализ влияния спейсерных слоев на нелинейные искажения вольт-амперных характеристик рНЕМТ на основе соединения GaAlAs/InGaAs

© Е.А. Тарасова<sup>1</sup>, С.В. Хазанова<sup>1</sup>, О.Л. Голиков<sup>1</sup>, А.С. Пузанов<sup>1</sup>, С.В. Оболенский<sup>1</sup>, В.Е. Земляков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603600 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет „Московский институт электронной техники“ (МИЭТ), 124498 Москва, Зеленоград, Росси

E-mail: tarasova@rf.unn.ru

Поступила в Редакцию 12 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 19 апреля 2021 г.

Принята к публикации 19 апреля 2021 г.

Работа посвящена результатам моделирования электрофизических параметров рНЕМТ структур на основе соединения AlGaAs/InGaAs/GaAs с помощью самосогласованного решения уравнения Шредингера и Пуассона. На основании численных расчетов предложен метод анализа нелинейных искажений передаточных вольт-амперных характеристик исследуемых транзисторов. Проведена оценка влияния спейсерных слоев и степени легирования  $\delta$ -слоя на нелинейность вольт-амперных характеристик.

**Ключевые слова:** AlGaAs/InGaAs/GaAs рНЕМТ, нелинейные искажения, спейсерные слои.

DOI: 10.21883/FTP.2021.10.51436.35

## 1. Введение

Известно, что применение гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs позволяет создать двумерный электронный газ в канале полевого транзистора с высокой подвижностью электронов (НЕМТ — High Electron Mobility Transistor) [1]. Так как параметры кристаллической решетки слоев не совпадают, такой транзистор называется псевдоморфным (рНЕМТ). Для увеличения концентрации электронов в канале используется  $\delta$ -легирование прилегающих к каналу областей широкозонного полупроводника. Для надежного пространственного разделения  $\delta$ -слоя и квантовой ямы, образующей канал полевого транзистора, а также в других технологических целях (например, снижения микрошероховатости гетерограницы), используют дополнительные тонкие спейсерные слои из нелегированного AlGaAs.

Концентрация электронов и их подвижность в канале полевого транзистора в конечном счете задают его передаточную вольт-амперную характеристику, крутизну передаточной характеристики и старшие производные, определяющие нелинейные свойства полупроводникового прибора. Известно [2], что усилители мощности на основе полевых транзисторов обладают линейностью только при небольших уровнях входного сигнала, при возрастании его мощности появляются нелинейные интермодуляционные искажения, приводящие к искажению выходного сигнала. Таким образом, корректный расчет исходных зависимостей концентрации электронов в канале полевого транзистора с двумерным электронным газом с учетом спейсерных слоев, изменяющих расстояние от поверхности затвора и  $\delta$ -слоя до квантовой ямы, является важным для оптимизации структуры по крите-

рию максимизации коэффициента усиления в линейном режиме.

Величина подвижности электронов рассчитывалась исходя из рассеяния на оптических фононах в 2D-газе [3]. Предполагалось, что наличие спейсерных слоев исключает влияние рассеяния электронов на заряженных примесях. Также учитывался эффект всплеска скорости электронов в коротких структурах [4,5].

## 2. Объект исследования

В работе проводится расчет электрофизических параметров рНЕМТ структур на основе соединения Al<sub>0.23</sub>Ga<sub>0.77</sub>As/GaAs/In<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>As со слоевой концентрацией электронов в канале  $1.5 \cdot 10^{12} - 2.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Анализировалось влияние как тонких GaAs спейсерных слоев вокруг слоя с  $\delta$ -легированием, так и спейсерных слоев вблизи канального слоя. Рассматривалось три варианта структуры: в первом случае не учитывались тонкие спейсерные слои из GaAs около  $\delta$ -слоя (табл. 1), во втором случае учитывались все спейсерные слои (табл. 2), в третьем варианте проводился учет спейсерных слоев, прилегающих к  $\delta$ -слою, но не учитывался спейсерный слой из GaAs вблизи канального слоя (табл. 3).

В данной работе для каждого из трех вариантов структур последовательно рассчитывались: зонные диаграммы и концентрация носителей заряда в канале исследуемых структур в зависимости от приложенного к затвору напряжения; ток, протекающий через транзистор в режиме насыщения и интермодуляционные искажения в модельном усилителе для двух вариантов уровня легирования  $\delta$ -слоя:  $5 \cdot 10^{24}$  или  $8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ .

**Таблица 1.** Параметры исследуемой полупроводниковой структуры. Вариант 1. Расстояние от затвора до верхней границы квантовой ямы — 24.7 нм

	Толщина, нм	Концентрация легирующей примеси, $\text{м}^{-3}$
Барьерный слой $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$	13	—
$\delta$ -слой $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$	3	$5 \cdot 10^{24}$ ( $8 \cdot 10^{24}$ )
Спейсерный слой $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$	7	—
Спейсерный слой GaAs	1.5	—
Канальный слой $\text{In}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$ (квантовая яма)	10	—
Буферная гетероструктура GaAs	44	—
Подложка GaAs	100	—

**Таблица 2.** Параметры исследуемой полупроводниковой структуры. Вариант 2. Расстояние от затвора до верхней границы квантовой ямы — 25.3 нм

	Толщина, нм	Концентрация легирующей примеси, $\text{м}^{-3}$
Барьерный слой $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$	13	—
Спейсерный слой GaAs	0.4	$5 \cdot 10^{22}$
$\delta$ -слой $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$	3	$5 \cdot 10^{24}$ ( $8 \cdot 10^{24}$ )
Спейсерный слой GaAs	0.4	$5 \cdot 10^{22}$
Спейсерный слой $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$	7	—
Спейсерный слой GaAs	1.5	—
Канальный слой $\text{In}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$ (квантовая яма)	10	—
Буферная гетероструктура GaAs	44	—
Подложка GaAs	100	—

**Таблица 3.** Параметры исследуемой полупроводниковой структуры. Вариант 3. Расстояние от затвора до верхней границы квантовой ямы — 23.8 нм

	Толщина, нм	Концентрация легирующей примеси, $\text{м}^{-3}$
Барьерный слой $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$	13	—
Спейсерный слой GaAs	0.4	$5 \cdot 10^{22}$
$\delta$ -слой $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$	3	$5 \cdot 10^{24}$ ( $8 \cdot 10^{24}$ )
Спейсерный слой GaAs	0.4	$5 \cdot 10^{22}$
Спейсерный слой $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$	7	—
Канальный слой $\text{In}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$ (квантовая яма)	10	—
Буферная гетероструктура GaAs	44	—
Подложка GaAs	100	—

### 3. Методика расчетов параметров исследуемой структуры

С помощью процедуры самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона в работе были проведены расчеты энергетического спектра, огибающие волновых функций и профиль распределения концентрации носителей заряда. Используемая численная схема решения основана на дискретизации в координатном пространстве с использованием как одномерной, так

и неоднородной сетки. Итерационная процедура самосогласованного решения данных уравнений позволяет находить профили потенциала и уровни размерного квантования с высокой точностью (до  $10^{-5}$  эВ) [6,7] при плавном изменении внешнего напряжения, приложенного в направлении роста структуры. Таким образом, в работе было получено семейство зонных диаграмм структуры и концентраций носителей заряда при различных напряжениях на затворе транзистора в диапазоне от 0 до 1 В с шагом 0.05 В.

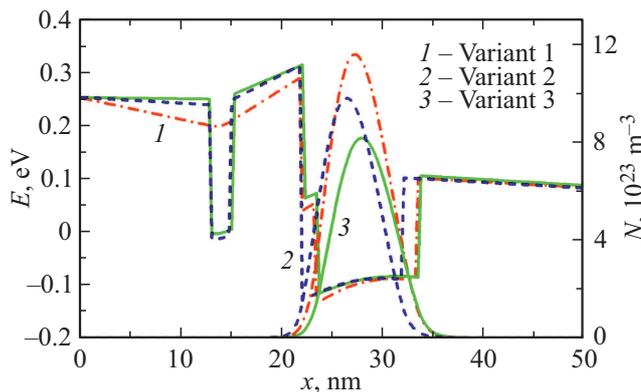
#### 4. Результаты расчетов

Результаты расчетов зонной диаграммы и профиля распределения электронов для исследуемых структур для всех трех вариантов (указанных в табл. 1–3) для концентрации  $5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$  приведены на рис. 1, для концентрации  $8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$  — на рис. 2.

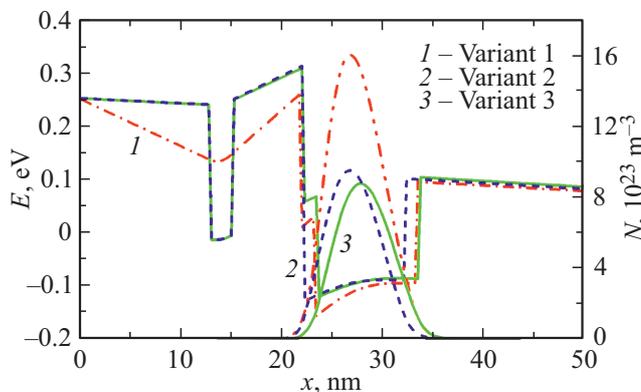
Полученные результаты использовались для аналитического расчета статических передаточных вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзистора на исследуемой гетероструктуре. ВАХ рассчитывались с помощью выражений для расчета скорости носителей заряда в канале и выражения для расчета плотности тока в канале транзистора:

$$I = W \cdot dg \cdot n \cdot V; \quad V = \frac{\mu E}{1 + \mu E / V_{\text{sat}}}, \quad (1)$$

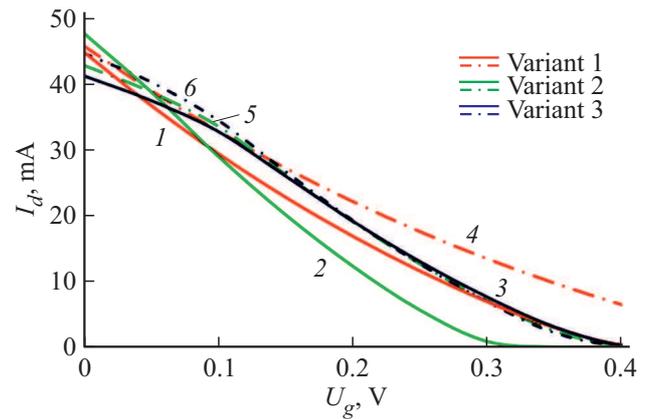
где  $I$  — ток,  $W$  — ширина затвора транзистора,  $n$  — концентрация носителей заряда,  $\mu$  — подвижность носителей заряда,  $e$  — заряд электрона,  $dg$  — толщина обедненной подзатворной области транзистора,



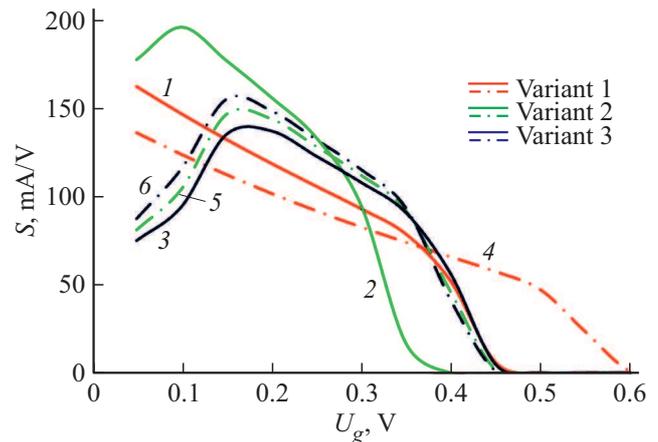
**Рис. 1.** Результаты расчетов зонной диаграммы и профиля распределения электронов исследуемой структуры для различных комбинаций спейсерных слоев. Степень легирования  $\delta$ -слоя  $5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ .



**Рис. 2.** Результаты расчетов зонной диаграммы и профиля распределения электронов исследуемой структуры для различных комбинаций спейсерных слоев. Степень легирования  $\delta$ -слоя  $8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ .



**Рис. 3.** Результаты аналитического расчета передаточных вольт-амперных характеристик исследуемого рНЕМТ для различных комбинаций спейсерных слоев. Сплошные кривые (1, 2, 3) соответствуют легированию  $\delta$ -слоя  $5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . Штрихпунктирные кривые (4, 5, 6) соответствуют легированию  $\delta$ -слоя  $8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).



**Рис. 4.** Результаты аналитического расчета крутизны передаточных вольт-амперных характеристик исследуемого рНЕМТ для степени легирования различных комбинаций спейсерных слоев. Сплошные кривые (1, 2, 3) — легирование  $\delta$ -слоя  $5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . Штрихпунктирные кривые (4, 5, 6) — легирование  $\delta$ -слоя  $8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ .

$V_{\text{sat}}$  — скорость насыщения. Учитывались полученная из численных расчетов интегральная концентрация носителей заряда в канале исследуемого НЕМТ при различных напряжениях на затворе и эффект всплеска скорости в канале транзистора согласно [4,5]. Зависимость толщины обедненной области в канале транзистора в зависимости от напряжения затвора рассчитывалась согласно [8].

Результаты аналитических расчетов передаточных вольт-амперных характеристик и крутизны ВАХ для трех вариантов структуры с различной степенью легирования  $\delta$ -слоя приведены на рис. 3 и 4 соответственно. Различия в полученных результатах объясняются разницей в расстоянии от затвора до верхней границы

квантовой ямы для каждого из трех рассмотренных вариантов.

## 5. Методика расчета интермодуляционных искажений

Известно, что интермодуляционные искажения 3-го порядка существенно ограничивают коэффициент усиления приемников, так как для двух близко расположенных частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  только продукты интермодуляции 3-го порядка  $2\omega_1 - \omega_2$  и  $2\omega_2 - \omega_1$  наряду с исходными сигналами проходят выходной фильтр усилителя [2].

Для безынерционного усилителя связь между входом  $x(t)$  и выходом  $y(t)$  описывается в виде

$$y(t) \approx \alpha_1 x(t) + \alpha_2 x^2(t) + \alpha_3 x^3(t) \quad (2)$$

и представляет собой разложение в ряд Тейлора в окрестности точки смещения [2].

Из приведенного выше выражения видно, что амплитуда выходных продуктов интермодуляции 3-го порядка увеличивается сильнее, чем амплитуда выходного сигнала на основных частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Таким образом, при повышении амплитуды входного сигнала амплитуда продуктов интермодуляции 3-го порядка в конечном итоге станет равной амплитуде основных тонов на выходе. Уровень, при котором это происходит называется точкой пересечения 3-го порядка (third-order intercept point) по входу (input third-order intercept point — ИПЗ) и выходу (output third-order intercept point — ОИПЗ) (см. вставку на рис. 5). Нетрудно получить, что

$$A_{ИПЗ} = \sqrt{\frac{3}{4} \left| \frac{\alpha_1}{\alpha_3} \right|}. \quad (3)$$

В монографии [2] приведено выражение для точки пересечения 3-го порядка по входу усилителя, построенного по схеме с общим истоком, для квадратичной

зависимости тока, протекающего через транзистор от напряжения на затворе в виде  $I_D = K \cdot (U_G - V_{TH})^2$ :

$$A_{ИПЗ} = \frac{(1 + R \cdot S)^2}{K} \sqrt{\frac{2 \cdot S}{3 \cdot R}}, \quad (4)$$

где  $R$  — нагрузочное сопротивление,  $S$  — крутизна ВАХ.

В данной работе указанное выражение расширено на случай, когда зависимость тока, протекающего через транзистор, от напряжения на затворе носит кубический характер

$$A_{ИПЗ} = \sqrt{\frac{8 \cdot S(1 + R \cdot S)^4}{(1 + R \cdot S) \frac{d^2 S}{dU_G^2} - 3 \cdot R \left( \frac{dS}{dU_G} \right)^2}}. \quad (5)$$

Результаты аналитических расчетов интермодуляционных искажений  $A_{ИПЗ}$  согласно формуле (5) для всех трех вариантов структуры с различной степенью легирования  $\delta$ -слоя приведены на рис. 5.

## 6. Заключение

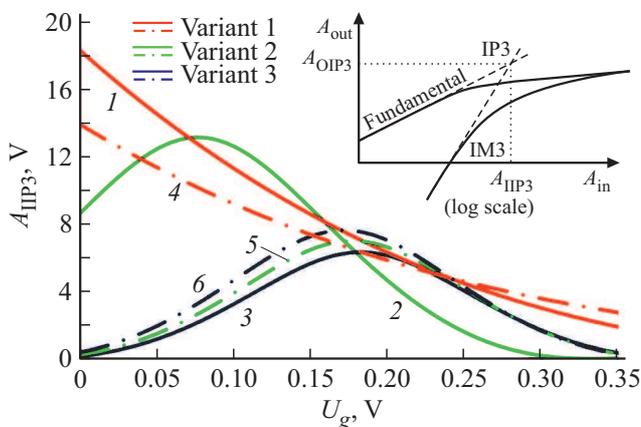
Результаты проведенных расчетов подтверждают исходный тезис о значительном влиянии спейсерных слоев на величину нелинейных интермодуляционных искажений в полевых транзисторах с двумерным электронным газом:

1. В случае отсутствия спейсерного слоя GaAs толщиной 0.4 нм  $A_{ИПЗ}$  монотонно уменьшается с ростом напряжения на затворе транзистора. Увеличение уровня легирования  $\delta$ -слоя приводит к уменьшению  $A_{ИПЗ}$  при малых напряжениях на затворе и увеличению  $A_{ИПЗ}$  при больших напряжениях на затворе.

2. При наличии одного спейсерного слоя GaAs толщиной 0.4 нм  $A_{ИПЗ}$  имеет максимум в зависимости от напряжения на затворе, при котором влияние нелинейных искажений минимально. Увеличение уровня легирования  $\delta$ -слоя приводит к уменьшению  $A_{ИПЗ}$  в точке максимума, но выравниванию относительно динамического диапазона ( $\sim 0.2$  В).

3. Аналогично при наличии двух спейсерных слоев GaAs толщиной 0.4 нм  $A_{ИПЗ}$  имеет максимум в зависимости от напряжения на затворе, но при этом увеличение уровня легирования  $\delta$ -слоя приводит к увеличению  $A_{ИПЗ}$ , т.е. улучшению характеристик транзистора. Также отмечена слабая зависимость изменения положения точки максимума от уровня легирования  $\delta$ -слоя.

Таким образом, по-видимому, оптимальной с точки зрения максимизации коэффициента усиления полевого транзистора в линейном режиме является структура с двумя спейсерными слоями GaAs толщиной 0.4 нм, окружающими  $\delta$ -слой, так как в этом случае при сравнимой величине  $A_{ИПЗ}$  с другими вариантами стабильность характеристик значительно выше.



**Рис. 5.** Результаты расчетов ИПЗ трех вариантов исследуемой структуры для двух степеней легирования. Сплошные кривые (1, 2, 3) — легирование  $\delta$ -слоя  $5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . Штрихпунктирные кривые (4, 5, 6) — легирование  $\delta$ -слоя  $8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ .

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания, проект 0729-2020-0057.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] T. Mimura. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, **50** (3), 780 (2002).
- [2] B. Razavi. *RF Microelectronics* (Hamilton Printing Company in Castleton, N.Y., 2012).
- [3] M. Lundstrom. *Fundamentals of carrier transport* (Cambridge University Press, 2000).
- [4] Ю. Пожела. *Физика быстродействующих транзисторов* (Вильнюс, Мокслас, 1989).
- [5] М. Шур. *Современные приборы на основе арсенида галлия* (М., Мир, 1991).
- [6] С.В. Хазанова, В.Е. Дегтярев, С.В. Тихов, Н.В. Байдусь. ФТП, **49** (1), 53 (2015).
- [7] С.В. Хазанова, В.Е. Дегтярев, Н.Н. Григорьева, О.Л. Голиков. *Физические и физико-химические основы ионной имплантации* (РИУ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2018).
- [8] Е.А. Тарасова, С.В. Оболенский, С.В. Хазанова, Н.Н. Григорьева, О.Л. Голиков, А.Б. Иванов, А.С. Пузанов. ФТП, **54** (9), 968 (2020).

Редактор Г.А. Оганесян

## The analysis of the influence of space layers on nonlinear distortions of pHEMT I–V characteristics based on GaAlAs/InGaAs

E.A. Tarasova<sup>1</sup>, S.V. Khazanova<sup>1</sup>, O.L. Golikov<sup>1</sup>,  
A.S. Puzanov<sup>1</sup>, S.V. Obolensky<sup>1</sup>, V.E. Zemlyakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lobachevsky State University  
of Nizhny Novgorod (NNSU),  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>National Research University  
of Electronic Technology (MIET),  
124498 Moscow, Zelenograd, Russia

**Abstract** The work is devoted to the results of modeling of the parameters of pHEMT structures based on the AlGaAs/InGaAs/GaAs compound using a self-consistent solution of the Schrödinger and Poisson equation. Based on numerical calculations, a method for analyzing nonlinear distortions of transfer I–V characteristics is proposed. The influence of the spacer layers and the degree of doping of the  $\delta$ -layer on the nonlinearity of the I–V characteristic is estimated.